낙동강 하류 원수의 응집제 주입 자동화를 위한 Streaming Current Detector (SCD)와 Charge Analyzing System (CAS)의 평가

Evaluation of Streaming Current Detector (SCD) and Charge Analyzing System (CAS) for automation of coagulant dosage determination

김상구 · 손희종[†] · 이정규 · 염훈식 · 유평중

Sang-Goo Kim · Hee-Jong Son[†] · Jeong-Kyu Lee · Hoon-Sik Yeom · Pyung-Jong Yoo

부산시 상수도사업본부 수질연구소

Water Quality Institute, Busan Water Authority

(Received January 25, 2017; Revised March 13, 2017; Accepted March 21, 2017)

Abstract : This study was conducted to investigate the characteristics of the stream current detector (SCD) and charge analyzing system (CAS), which are well known as the automatic coagulant dosage determination instruments. When the SCD system was used, the current charge value set at pH 9.3 could not be used as the coagulant dosage when the pH of the raw water decreased to 5.7, and the current charge value corresponding to pH 5.7 was required to be reset. In case of CAS system, polydadmec is stable as a cationic titrant when the pH of the raw water ranged 9.3 to 6.0. And it was effective to use polydadmec as a cationic titrant for high turbidity water. The current charge of polydadmec was almost constant between pH 5 and 11, however, the difference in charge of alum is six times in this pH range. Therefore, when the pH of the raw water was changed, it seems that the coagulant used in the actual water treatment plant was as a good cationic titrant.

Key Words : Coagulation, Stream Current Detector (SCD), Charge Analyzing System (CAS), Cationic Titrant, Polydadmec, Alum

요약 : 본 연구에서는 낙동강 하류원수에 대한 응집제 주입을 자동화를 위해 stream current detector (SCD)와 charge analyzing system (CAS)의 적용성 비교·평가하였다. SCD 시스템을 이용한 경우, 원수 pH가 9.3에서 5.7로 낮아지면 pH 9.3에서 설정된 유동 전하값을 응집제 주입율로 사용할 수 없었고, pH 5.7에 맞는 유동 전하값의 재설정 필요하였다. 원수의 pH 변화에 따른 SCD의 유동 전하값의 재설정을 하지 않을 경우, 후단의 모래여과 처리수 탁도가 증가하는 현상을 보였다. CAS 시스템의 경우는 원수 pH의 범위가 6.0~9.3의 범위일 때 polydadmec을 전하 중화제로 사용하는 것이 가능하였고, 고탁도 원수에도 polydadmec이 양호한 전하중화제로 평가되었다. 그러나 pH 5~11의 범위에서 polydadmec의 전하량은 거의 변화하지 않은 반면, 응집제로 사용되는 alum의 전하량은 6배 정도 차이가 발생하고, pH에 적합한 응집제 요구량을 보였다. 따라서 원수의 pH가 높은 경우는 전하 적정제로 정수장에서 사용하는 응집제를 직접 이용하는 것이 효율적이었다.

주제어 : 응집, Stream Current Detector, Charge Analyzing System, 양이온 적정제, 폴리데드막, 알럼

1. 서론

수처리에서 사용되는 응집제는 수중의 콜로이드 물질의 전하 중화나 수산화 알루미늄 형성을 통하여 콜로이드 흡착으로 수중입자들을 뭉치게 한다. 원수 수질에 따라 전하 중화에 필요한 응집제 주입율은 달라지며, 최적의 응집효과를 나타내기 위해서는 적절한 응집제 주입율이 요구된다. 일반적으로 최적 응집제 주입율을 결정하는 방법으로 jar-test를 가장 많이 사용하고 있고, 이러한 이유로는 다양한 수질에서도 범용적으로 사용할 수 있다는 장점 때문이다. 그러나 jar-test는 운영자에 의해 최적 응집제 주입율에 차이가 발생할 수 있으며, 실험을 수행하는데도 많은 시간이 소요되는 단점을 가지기 때문에 수질이 급변하는 시기에는 지속적인 jar-test 수행을 통하여 최적 응집제 주입율을 결정하기에는 무리가 있다.

Kim 등¹⁾은 응집제주입 후 in-line filter를 통한 잔류탁도를 측정하면서 적정 응집제 주입율과 응집 현상을 평가하였다.

이러한 연구들은 원수 변화에 따라 적절한 응집제 주입율을 직접 결정하는 방법이 아니고 응집공정의 후단에서 수질을 모니터링하는 방법이다. Dentel 등^{2,3)}은 원수의 수질변화에 따라 자동적으로 응집제 주입율을 결정하기 위하여 유동 전위(streaming current, SC)를 측정하는 연구를 수행하였는데, 수중 입자 주위의 분산층을 기기적으로 파괴하여 분산층 밖의 배경이온과의 농도차이에 따른 유동 전위를 측정하였다. 그리고 유동 전위와 제타 전위의 선형적인 관계를 이용하여 응집제 주입율 변화에 따른 유동전하의 빠른 변화를 측정함으로써 SCD (stream current detector)를 이용한 응집특성을 평가하였다.

수처리 공정에서의 응집제 자동주입장치를 이용한 연구 결과들로는 Kim 등⁴⁾이 보고한 하수처리 공정에서의 인 제거를 목적으로 CAS (charge analyzing system)의 적용성 평가와 Xing 등⁵⁾의 UF막 공정의 전처리 공정으로 응집공정 적용시 SCD를 이용한 막 오염 저감 및 수중의 유기물질 제거에 관한 연구들이 있다.

[†] Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4788 Fax: 051-669-4669

본 연구에서는 낙동강 하류 원수에 대해 응집제 주입율을 자동으로 결정·주입하기 위하여 원수수질의 변화에 따른 SCD의 적용가능성을 평가하였다. 또한 SC를 이용한 새로운 응집제 주입율 결정방법으로 먼저 jar-test에서 결정된 적정 응집제 주입율과 SC값의 전하중화에 소비된 양이온 적정량으로 적정 응집제 주입율을 결정하는 CAS의 적용가능성도 함께 비교 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. Pilot-plant 및 on-line용 응집제 자동투입 시스템

낙동강 하류 원수에 대한 적정 응집제 주입율 결정을 위하여 낙동강 하류 원수를 정수처리하는 pilot-plant에 on-line용 응집제 자동투입 시스템을 설치하여 평가하였다. Pilot-plant는 총 3 계열(계열 당 100 m³/일 용량)로 구성되어 있으며, 각 계열별 공정은 원수, 전오존, 응집-침전-여과, 후오존 및 생물활성탄 공정으로 구성되어 있다.

적정 응집제 주입율 결정을 위해서 SCD와 CAS 시스템을 각각 pilot-plant의 두 계열에 설치하였다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 SCD 시스템의 경우, pilot-plant의 1 계열에 설치하여 응집제 주입 후 급속 혼화지에서 완속 혼화지로 이송되는 급속혼화수의 SC값을 측정하여, SC 측정값이 jar-test에서 결정된 설정치에 근접하도록 응집제 주입펌프를 이용하여 응집제 주입율을 조절하였다. CAS 시스템의 경우는 Fig. 1(b)와 같이 pilot-plant의 2 계열에 설치하여 응집제 투입 전 단계의 원수를 채수하여 CAS 시스템에서 원수의 전하중화에 필요한 양이온 소비량을 측정한 후 jar-test에서 결정된 응집제 주입율과 양이온 소비량과의 관계를 이용하

여 응집제 주입율을 결정하였으며, 인위적으로 수질을 변화시켰을 때 이들 SCD와 CAS의 적용 가능성을 평가하였다.

2.2. On-line용 응집제 자동투입 시스템

2.2.1. SCD 시스템

On-line용 SCD 시스템((주)삼보과학)을 이용한 자동 응집제 주입율 결정 방법은 먼저 jar-test를 수행하여 최적의 응집제 주입율을 먼저 결정하고, 이때의 유동 전위(stream current, SC)값을 측정한 후 pilot-plant 급속 혼화수의 SC값도 최적으로 응집제가 투입된 jar-test 시료수와 동일한 SC값이 되도록 응집제 주입량을 증감하는 방식이다.

2.2.2. CAS 시스템

On-line용 CAS 시스템((주)삼보과학)을 이용한 응집제 자동 주입율 결정은 원수의 전하를 0 mV로 조절하는데 소요되는 양이온 농도를 먼저 결정하고, 결정된 양이온 농도를 응집제 주입율로 환산하는 방식이다. 즉, 목적 원수의 전하를 중화시키는데 소요된 양이온량을 C_q , jar-test에서 결정된 응집제 주입율을 C_d 라고 하면 이들 사이에 아래와 같은 식 (1)이 성립된다. C_d 는 응집제 주입율(mg/L), C_q 는 양전하 소비량(L), C_v 는 응집제 주입율 상수(mg/L²)이며, 여기서 C_v 는 모든 수질에서 일정하다고 가정하였다. 원수의 전하 중화를 위해 사용된 양이온 적정제로 poly-dadmac (Sigma-aldrich, U.S.A.)과 응집제인 alum (홍원산업)과 PACl (poly-aluminium chloride, 홍원산업)을 사용하였으며 poly-dadmac은 0.0001 N로 조제하여 사용하였고,⁶⁾ alum과 PACl은 1,000배 희석하여 사용하였다. 전하 중화를 위해 사용된 시료량은 20 mL로 고정하였다. CAS는 Fig. 2와 같이 시료채수부, 양이온적정부, 컨트롤부 등으로 구성되어 있다.

$$C_d = C_q \times C_v \quad (1)$$

Fig. 1. SCD and CAS system for optimal coagulant dosing and installing sites in drinking water treatment process.

Fig. 2. Charge analyzer system.

2.3. 원수 성상 및 lab scale 수질변화 실험

원수 수질변화에 따른 SCD 및 CAS의 적용 가능성 평가를 위해 원수의 pH와 탁도를 인위적으로 변화시켜 실험하였다. 원수의 pH 변화실험에서는 pH를 4에서 11까지 변화시키면서 전하중화에 소요되는 양이온 양을 측정한 후 식 (1)에서 산정된 응집제 주입율과 jar-test에서 결정된 응집제 주입율을 비교함으로써 CAS를 이용한 응집제 주입율 적용 가능성을 평가하였다. 고탁도 실험은 홍수기시 낙동강 원수의 탁도가 400 NTU 정도까지 증가한 시기에 한시적으로 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Pilot-plant를 이용한 SCD 및 CAS 성능 평가

3.1.1. 원수 pH 저하에 따른 SCD 및 CAS 성능 평가

Pilot-plant로 유입되는 원수의 pH가 9.3일 때 황산을 주입하여 인위적으로 원수의 pH를 저하시켰을 경우 SCD와 CAS에 의한 응집제 주입율과 모래여과 처리수의 수질 변화를 Fig. 3과 4에 나타내었다.

Fig. 3에는 원수 pH가 9.3에서 급격하게 5.7과 5.6으로 낮아졌을 때 SCD에 의한 응집제 주입율과 탁도변화를 나타내었다. SCD 시스템의 SC값 설정은 원수의 pH가 9.3일 때 jar-test를 수행하여 설정한 값인 -15 mV를 변화 없이 그대로 사용하여 응집제 주입율을 결정하였다. 원수의 pH가 9.3일 때 SCD 시스템에 의해 결정된 응집제 주입율은 50~60 mg/L 정도였고, 이 조건에서 모래여과 처리수의 탁도는 0.05~0.1 NTU 사이로 일정하게 유지되었다. 유입원수에 황산을 주입하여 pH를 5.7 부근으로 저하시켰을 때 응집제 주입율이 30 mg/L 정도로 점진적으로 감소하면서 모래여과 처리수의 탁도가 증가하는 현상을 나타냈다. 이는 적정한 응집제 주입율이 40~45 mg/L인 점을 감안하면 응집제 주입율이 부

Fig. 3. Characteristics of coagulant dosage and filtrate turbidity change by SCD according to the decreasing pH of raw water.

Fig. 4. Characteristics of coagulant dosage and filtrate turbidity change by CAS according to the decreasing pH of raw water.

Fig. 5. Characteristics of coagulant dosage and filtrate turbidity change by CAS according to the lower pH 4.

족해서 여과수 탁도가 증가한 것으로 평가되었다. 또한, 황산 투입을 중지하여 원수의 pH를 9.3으로 회복시켰을 경우에는 CAS 시스템에서의 응집제 주입율이 증가하여 모래여과 처리수의 탁도도 점진적으로 안정화되었으나 다시 원수에 황산을 투입하여 pH를 5.6 부근으로 저하시킨 경우에는 이전과 유사한 현상이 발생하였다. 따라서 pH가 5.7인 원수의 적정 응집제 주입율을 결정하는 SC값은 pH가 9.3인 원수의 적정 응집제 주입율을 결정하는 SC값과는 다른 SC값의 설정이 필요한 것으로 나타나 원수의 pH 변화에 따라 항상 jar-test를 수행하여 적정 SC값의 재설정 필요한 것으로 조사되었다.

pH가 9.3인 원수에 황산을 주입하여 pH를 6 부근으로 저하시켰을 때 CAS 시스템(양이온 적정제: poly-dadmac)의 응집제 주입을 변화와 이에 따른 모래여과 처리수의 잔류탁도 변화를 Fig. 4에 나타냈다. 원수의 pH가 9.3 부근일 경우에는 응집제 주입율이 50 mg/L 정도였으나 원수의 pH를 6.1 부근으로 저하시킨 경우에는 응집제 주입율이 40~45 mg/L 정도로 감소되었고, 모래 여과처리수의 탁도가 0.1 NTU 이하로 유지되어 pH가 6.0 정도의 원수 수질에서도 CAS 시스템(양이온 적정제: poly-dadmac)은 적용이 가능함을 알 수 있었다.

황산을 이용하여 pilot-plant 유입원수의 pH를 3.9까지 더욱 낮춘 경우에서 CAS 시스템의 적용 가능성을 평가한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 원수의 pH를 3.9까지 낮춘 경우에는 응집제 주입율이 20~50 mg/L 사이의 범위에서 심하게

변동하는 것으로 나타났으며, 모래여과 처리수의 탁도도 2 NTU 이상으로 증가하여 pH가 4 정도로 낮은 원수에서는 CAS의 적용이 곤란하였으나 평상시 낙동강 하류원수의 경우, pH가 7 이하로 낮아지지 경우가 매우 드문 것을 감안하면 낙동강 하류에 위치한 정수장의 자동 응집제 주입 시스템으로 CAS의 적용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.1.2. 원수 pH 상승에 따른 SCD 및 CAS 성능 평가

Pilot-plant로 유입되는 원수 pH가 8.1일 때 NaOH를 주입하여 인위적으로 원수 pH를 상승시켜 SCD와 CAS에 의한 응집제 주입율 및 모래여과 처리수 수질 변화를 Fig. 6과 7에 나타내었다.

SCD를 적용한 결과를 나타낸 Fig. 6의 경우, SCD 전하값을 -15 mV로 설정하고 pH 8.1인 원수에 응집제 주입 전에 NaOH를 주입하여 유입원수 pH를 9.4로 상승시켰다. 그 결과 응집제 주입율이 45 mg/L (pH 8.1)에서 급격히 증가하여 67~77 mg/L의 범위로 변화하였으나, 모래여과 처리수의 탁도는 큰 변화가 없었다. 이후 유입원수에 NaOH 투입을 중단하여 유입원수의 pH를 8.1 정도로 저하시키자 pH 변화에 따른 SC의 증가로 응집제 주입이 중단되었고 이로 인해 약 2시간 이후 여과수탁도가 증가하는 현상이 나타났고, SC값의 안정화에는 4시간 정도의 시간이 소요되어 유입원수 pH에 급격한 변화 발생시 SCD에 설정된 SC값을 찾기까지 많은 시간이 소요됨을 알 수 있었다.

Fig. 6. Characteristics of coagulant dosage and filtrate turbidity change by SCD according to the increasing pH of raw water.

Fig. 7. Characteristics of coagulant dosage and filtrate turbidity change by CAS according to the increasing pH of raw water.

pH가 8.2인 원수에 NaOH를 주입하여 pH를 9.6 부근으로 상승시켰을 때 CAS(양이온 적정제: poly-dadmac)의 응집제 주입을 변화와 이에 따른 모래여과 처리수의 잔류탁도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. pH를 8.2에서 9.6 혹은 9.7로 증가시켰을 때 응집제 주입율이 35~38 mg/L에서 43~48 mg/L로 변화되어 8~10 mg/L 정도 응집제 주입율이 증가하였다. 그러나 증가된 응집제 주입율로는 원수의 pH 변화에 따른 적정 응집제 양이 주입되지 못한 결과를 나타내었다. 이는 CAS에서 원수의 전하 중화를 위해 사용된 poly-dadmac과 pilot-plant에서 응집제로 사용된 alum이 가지는 전하량의 차이로 인해 발생한 결과로 판단되어 실험실에서 원수의 pH 변화에 따른 poly-dadmac과 alum의 전하량 값의 변화에 대한 평가가 필요한 것으로 나타났다.

3.2. 원수 pH 변화에 따른 CAS의 전하 중화용 양이온 적정제 평가

pH를 인위적으로 4~11의 범위에서 변화시킨 낙동강 하류원수 20 mL를 중화시키는데 소모된 0.0001 N poly-dadmac과 1,000배 희석한 alum의 소비량 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

Alum의 경우 원수 pH가 상승함에 따라 전하 중화에 소모되는 alum의 양도 함께 증가하였으며, pH 6 부근에서는 전하 중화에 0.1 mL 정도 소비되는 alum 양이 pH 8 부근에서는 0.18 mL, pH 11 부근에서는 0.61 mL로 증가하여 원수의 pH 변화에 따라서 전하 중화에 소비된 alum의 소비량에 큰 변화가 나타났다. 반면 poly-dadmac의 경우는 원수 pH 5~11 사이에서는 전하 중화에 소비된 poly-dadmac의 양에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 같은 pH 변화나 pH 변화폭이 큰 상수원수에 poly-dadmac을 CAS 시스템의 전하중화제로 사용할 때, poly-dadmac은 pH 변화에 따라 전하량의 차이가 크게 나타나지 않은 반면, 알루미늄계 응집제는 pH 변화에 따라 전하량의 차이가 크게 나타남으로 pH 변화가 있는 원수에 대해 poly-dadmac을 양이온 적정제로 사용하여 결정된 응집제 주입율은 실제 알루미늄계 응집제 주입율과 많은 차이가 발생한다. 이는 앞의 Fig. 7에서 유입 원수의 pH 상승시 poly-dadmac을 양이온 적정제로 사용하여 CAS의 응집제 주입율을 결정하였을 때 모래여과 처리수의 탁도가 높게 나타난 이유를 설명하고 있다.

원수의 pH 변화에 따른 poly-dadmac과 alum의 전하량 변화

Fig. 8. Amount of cations required for charge neutralization.

Fig. 9. Amount of charge of alum and poly-dadmac according to change of raw water pH.

를 평가하기 위하여 0.001 N의 농도로 조제된 polyvinylsulfonic acid에 100배 희석한 alum과 0.0001 N poly-dadmac으로 전하 중화시 소비된 alum과 poly-dadmac의 양을 이용하여 전하량 변화를 평가한 것을 Fig. 9에 나타내었다. Poly-dadmac의 경우, 원수의 pH가 4에서 11로 상승하면 전하량은 0.118 eq/L에서 0.103 eq/L로 소폭 감소하여 큰 차이를 보이지 않은 반면 alum의 경우는 pH 4 부근에서 0.119 eq/L로 나타나 가장 높은 전하량을 나타내었으며, pH 4 부근을 기준으로 pH의 저하 또는 상승에 따라 전하량이 급격히 감소하였다. 또한, 원수의 pH 6 이상에서는 오히려 음(-) 전하를 띄는 것으로 나타나 일반적으로 pH 변화에 따른 알루미늄의 전하량에 따른 것으로 나타났다.

응집제인 alum의 전하량은 pH 변화에 큰 영향을 받는 반면, poly-dadmac은 큰 영향을 받지 않아 pH 변화가 잦은 상수원수에서는 CAS에서 전하 중화를 위한 양이온제로

poly-dadmac이 아니라 응집제를 직접 양이온제로 사용하는 것이 타당한 것으로 나타났다. Tanaka 등⁷⁾은 응집제 자동 주입을 결정시 요구되는 양이온 적정제의 선택이 매우 중요한 요인으로 보고하고 있으며, 양이온 적정제의 특성에 따라서 수중의 음이온 중화능에 많은 차이가 유발될 수 있기 때문에 평가하였다.

3.3 원수 pH 변화에 따른 jar-test

pH가 7.6인 원수에 NaOH를 주입하여 pH를 8.7, 9.4, 10.3로 상승시켜 pH가 변화된 4 종류의 원수를 이용하여 응집제 주입율에 따른 침전 후의 잔류탁도 변화를 Fig. 10에 나타내었다. pH 7.6과 8.7인 시료수의 최적 응집제 주입율 범위는 40~60 mg/L 정도로 나타났고 pH를 9.4로 상승시킨 경우의 최적 응집제 주입율 범위는 50~70 mg/L로 나타나 약 10~20 mg/L 정도 응집제 주입율이 증가하였다. 또한, 원수 pH가 10.3인 경우 최적 응집제 주입율 범위는 120~140 mg/L 정도로 pH 8.7의 최적 응집제 주입율 범위에 비하여 2~2.5배 정도의 응집제 주입율이 증가하였다. 앞의 Fig. 7에 나타난 원수의 pH 변화에 따라 전하 중화에 소비되는 양이온 중화제의 소비량이 alum에서는 많은 차이가 났으나 poly-dadmac의 경우는 큰 차이를 보이지 않은 결과와 일치하는 현상이다.

낙동강 하류원수 탁도 변화시 전하 중화를 위해 사용되는 3 종류의 양이온 적정제들(alum, PAC 및 poly-dadmac)에 대해 전하 중화시 소비되는 소비량을 Fig. 11에 나타내었다. 응집제인 alum과 PAC의 경우는 원수의 탁도 증가에 따라 전하 중화에 소비되는 양이온 적정제 양의 차이가 크게 나타나지 않았으나, poly-dadmac은 탁도 증가와 함께 전하 중화에 소비되는 양도 함께 증가하였다. 이러한 결과는 다른 수질인자가 동일한 경우 원수에 함유된 탁도 유발물질의 농도에 관계없이 거의 동일한 응집제가 투입된다는 의미이다.

Fig. 10. Jar test results according to various pH of raw water.

Fig. 11. Amount of cation consumed for neutralization of high turbidity water.

Fig. 12. Residual Turbidity according to variation of raw water turbidity by jar-test.

Alum을 이용하여 탁도 변화에 따른 jar-test를 수행한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 원수 탁도가 높을수록 적정 응집제 주입율도 증가하므로 원수에 탁도 유발물질의 농도가 높은 고탁도 유입시에는 alum과 같은 응집제를 양이온 전하 중화제로 사용하기에는 적합하지 않았다. 이에 반해 poly-dadmac은 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 수중의 탁도 증가와 함께 전하 중화에 소비되는 poly-dadmac의 소비량도 증가하므로 고탁도시에는 poly-dadmac이 효과적인 CAS 시스템의 전하중화제로 평가되었다.

4. 결론

낙동강 하류 원수에 대해 응집제 주입율을 자동으로 결정·주입하기 위하여 원수수질의 변화에 따른 SCD와 CAS의 적용가능성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) SCD를 설치한 경우, 원수의 pH 변동에 따라 stream current값의 재설정이 요구되었고, 재설정을 하지 않을 경우에는 잘못 산정된 응집제 주입율로 인해 모래여과 처리수의 수질이 악화되었다.
- 2) CAS를 설치한 경우, 원수 pH의 큰 변동이 없는 시기에는 양이온 적정제로 응집제와 poly-dadmac 모두 안정적이었고, 고탁도시에는 응집제 보다 poly-dadmac을 양이온 적정제로 사용하는 것이 효과적이었다.
- 3) CAS의 양이온 적정제인 poly-dadmac은 원수 pH 4~11 사이에서는 poly-dadmac이 가지는 전하가 거의 변화가 없었고, 응집제인 alum은 원수 pH 변화에 따라 전하량이 변화하기 때문에 원수 pH의 변화시에는 정수장에서 사용되는 응집제를 직접 양이온 적정제로 사용하는 것이 효과적이었다.

KSEE

References

1. Kim, S. G., Choi, K. J., Son, H. J., Jun, Y. C., Rhee, J. B., Shon, I. S., Lee, Y. D. and Kim, S. H., "Monitoring of coagulation performance and determination of coagulant dosage using a pilot in-line filter," *Water Sci. Technol.*, **53**(4~5), 411~417(2006).
2. Dentel, S. K., Thomas, A. V. and Kingery, K. M., "Evaluation of the streaming current detector-I. Use in jar tests," *Water Res.*, **23**(4), 413~421(1989).
3. Dentel, S. K., Thomas, A. V. and Kingery, K. M., "Evaluation of the streaming current detector-II. Continuous flow tests," *Water Res.*, **23**(4), 423~430(1989).
4. Kim, W. K., Sung, Y. K., Yoo, H. S. and Kim, J. T., "Optimization of coagulation/flocculation for phosphorus removal from activated sludge effluent discharge using an online charge analyzing system titrator (CAST)," *J. Ind. Eng. Chem.*, **21**, 269~277(2015).
5. Xia, S., Li, X., Zhang, Q., Xu, B. and Li, G., "Ultrafiltration of surface water with coagulation pretreatment by streaming current control," *Desalination*, **204**(1~3), 351~358(2007).
6. Nam, S. W., Jo, B. I., Kim, M. K., Kim, W. K. and Zoh, K. D., "Streaming current titration for coagulation of high turbidity water," *Colloid Surface A*, **419**, 133~139(2013).
7. Tanaka, H. and Ichiura, H., "A novel and simple method for determining the cationic demand of suspensions using chromophoric labeled cationic polymers," *Colloid Surface A*, **159**, 103~107(1999).